

서남해안의 해수면 상승과 해일고 증가 경향 Rising Tendencies of both Tidal Elevation and Surge Level at the Southwestern Coast

강주환* · 박선중** · 박민원***

Ju Whan Kang*, Seon Jung Park** and Min Won Park***

요 지 : 목포와 제주를 위시한 서남해안에서 최근 예측 고조위가 증가하는 경향을 보이고 있다. 조화분석을 통한 자료분석 결과 서남해안 전반에 걸쳐 평균해수면이 뚜렷하게 증가하는 반면 반일주조의 진폭은 감소하는 것으로 나타나고 있다. 또한 태양연주조(Sa분조)의 진폭이 증가한 것으로 나타나고 있으며 이에 따라 하절기의 고조위가 더욱 상승한 것으로 확인되었다. 21세기 들어 RUSA와 MAEMI 등 대형 태풍의 발생이 잦아지고 있어 1990 년대에 비해 서남해안에서의 최대해일고가 크게 증가하였다. 또한 이들은 7월~9월에 집중되고 있어 하절기 고조위 상승과 함께 이상고조위 발생 가능성을 더욱 우려스럽게 하고 있다. 특히 목포해역은 하구언과 방조제 건설 이후 이상고조 발생 가능성이 현격히 높아진 해역이므로 더욱 그러한 실정이며, 평균해수면 상승경향이 매우 뚜렷한 제주해역 역시 향후 이상고조 발생 가능성이 매우 높을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 해수면 상승, 해일고, 이상고조, 조화분석, Sa분조, 서남해안

Abstract : Recently, rising tendency of high water level is detected at southwestern coast. The result of harmonic analysis shows increasing trend of mean sea level, decreasing trend of the amplitudes of semi-diurnal tidal constituents, and increase of Sa tidal constituent, therefore, additional increase of high water level at Summer season. It shows also that maximum surge level has increased greatly, according to the frequent visit of big typhoon such as RUSA and MAEMI. Considering the correspondence of Sa and typhoon period, namely July~September, extraordinary high water level would be more probable. Especially, Mokpo and Jeju would be considered to have many chances of extraordinary high water level in the future.

Keywords : sea level rise, surge height, extraordinary high water level, harmonic analysis, Sa tidal constituent, southwestern coast

1. 서 론

평균해수면과 고조위 등을 포함한 각종 해수면은 장기간에 걸쳐 지속적인 변화를 보인다. 이러한 변화의 원인은 조석 자체의 변화와 비조석 변화로 구분할 수 있다. 일반적으로 자연상태에서 조석(천문조)의 변화는 매우 미미하지만 연안에서 건설사업 등 인위적인 해안환경변화가 있는 경우에는 천문조에도 적지 않은 변화가 발생할 수 있다. 대표적인 예로서 목포항에서는 영산강하구언과 영

암방조제 및 금호방조제 건설에 따라 60 cm가 넘게 고조조위가 상승한 바 있다(강 등, 2006). 비조석 변화로는 지구온난화에 따른 전지구적 해수면 상승 및 기후변화에 의해 유발되는 각종 요인을 들 수 있다(Pugh, 2004).

일반적으로 해수면에 영향을 미치는 비조석 변화요인으로 기온 및 수온, 대기압, 바람, 퇴적현상(Morton et al., 2000) 등이 있다. 단기적으로는 태풍이나 저기압 발생시 대기압 변화와 바람에 의한 해수면 변화가 크게 작용하는 반면 계절적인 변화 요인으로는 수온 및 대기압

*정회원·목포대학교 건설공학부 교수·공학박사(E-mail: jwkang@mokpo.ac.kr)

**정회원·목포대학교 건설환경협동과정 박사과정·공학석사(E-mail: sjpark@mokpo.ac.kr)

***정회원·목포대학교 토목공학과 석사과정(E-mail: pmw@mokpo.ac.kr)

이 가장 지배적인 요소가 되어 수온의 변화가 해수밀도를 변화시켜 해수면이 여름에는 높고 겨울에는 낮게 나타나게 된다. 또한 장기적인 요소로서는 지구온난화 및 빙하의 해빙, 퇴적현상 등의 요인에 의한 해수면 변화 등이 있다.

평균해수면 변화와 관련된 국내 연구로 Oh et al.(1993)은 한국, 러시아, 일본을 모두 포함하는 동해 46개 관측점에서 계절별 해수면 변동을 분석한 바 있고, Pang and Oh(1994)은 이 자료를 대폭 보완하여 103개 지점에서 계절별 연교차 뿐 아니라 수개월 내지 24개월 주기의 특성을 분석한 바 있다. 또한 Choi et al.(1999)은 동해 자료에 중국 연안 자료를 추가하여 계절별 변화와 연별 변화를 세밀하게 고찰한 바 있으며 강 등(2005)은 서남해역에서 평균해수면 뿐 아니라 평균 고/저조위에 대한 해수면 변화를 분석한 바 있다. 그러나 이들 연구에서는 계절별 변화가 일정하게 유지되고 있다는 전제하에 연구가 수행되었는데, 최근 자료에 의하면 계절별 변화가 21세기 들어 다소 심해지고 있으며 초대형 태풍 발생이 우려되고 있다는 근거가 제시되고 있어 이에 대한 연구가 필요할 실정이다.

실제로 전지구적 해수면 상승은 우리나라에서도 나타나고 있는 현상이고, 지구온난화에 따른 기상이변에 의해 초대형 태풍 발생 위험도 점차 늘고 있는 실정이다. 특히 전지구적 해수면 상승에 따라 향후 해안범람의 위험이 크게 늘 것이며 연안에 미치는 영향은 심대할 것이다(Nicholls, 2002). 이러한 배경하에 본 연구에서는 주로 서남해안에 위치한 기준검조소 자료를 대상으로 1990년 이후의 조위 자료 분석을 통해 지구온난화에 따른 해수면 변화 경향을 고극조위에 주안점을 두고 고찰하였다.

2. 조위자료분석

2.1 고조위 분석

본 연구에서는 1년치 자료를 대상으로 조화분석을 통해 조화상수를 추출하게 되므로 단기간이라도 결측이 있으면 해당연도는 분석대상에서 제외하였다. 분석대상으로 선정한 자료는 Fig. 1에 제시된 국내 기준 검조소 자료 중 서남해안에 위치한 목포, 완도, 여수, 거문도, 추자도, 제주, 서귀포 등 7개 검조소 자료이며, 여타 일부 검조소 자료도 참고자료로 활용하기 위하여 분석대상에 포함시켰다. 그러나 대부분의 서해안 자료는 결측치가 매우 많아 인천(90년대까지는 월미도 검조소 자료)과 군산의항을 제외하

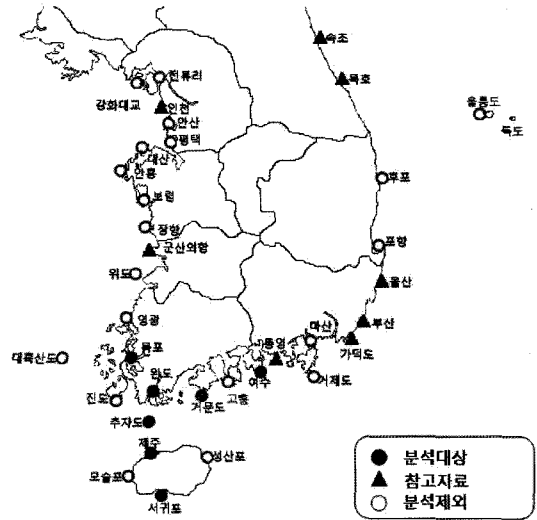


Fig. 1. Standard tidal observation site.

고는 대상에서 제외하였으며, 이 두 지점도 건설에 의한 영향에 의해 자료의 질에 다소 문제가 있다. 남해안은 결측이 많지 않아 대부분 포함시켰으며, 조차가 크지 않은 동해안 자료는 울산, 목호, 속초 등 3개 검조소 자료만 참고자료로 활용하였다.

이들 자료의 분석방법은 기존연구(문 등, 2006)에서 사용된 사후추정법과 고조위의 극대값 산정을 위해 2차 함수를 이용한 내삽법을 사용하였다. 즉, 각 조위관측소별로 매년 조화분석을 통해 해당연도의 조화상수를 추출한 후, 추출된 조화상수를 이용하여 해당연도의 천문조를 사후추정하였다. 현재 국립해양조사원에서 조위예측을 위해 해당연도의 직전년 자료를 조화분석한 결과를 이용하고 있는데, 본 연구에서의 방법은 사후예측이기 때문에 해당년도 자료를 그대로 사용하여 조화분석한 결과를 예측치로 설정하므로 해양조사원의 사전예측치에 비해 더욱 정확한 결과라 할 수 있다. 이렇게 산정된 관측치와 천문조 추정치의 차이로부터 해일고(조위편차)를 계산하였기에 해일고 역시 보다 정확도를 높일 수 있었다. 조화분석과 조위예측을 위해 사용된 프로그램은 각각 TIRA(Murray, 1964)와 MARIE로써 최근 관련연구에 널리 이용되고 있다.

이렇게 예측한 1990년대 이후의 목포와 제주에서의 예측고조위를 크기순으로 순위를 정해 Table 1에 제시하였다. 목포의 경우 역대 최고 예측조위(고극조위)는 2004년 8월 2일의 527 cm이고 이날 실제 관측된 조위는 524 cm로서 -3 cm의 조위편차를 보이고 있다. 상위 48위 이내의 자료는 모두 2000년 이후에 발생되고 있으며 49위인

Table 1. Ranking of highest water level(cm)

순위	목포				순위	제주			
	발생연월일	예측조위	관측조위	조위편차		발생연월일	예측조위	관측조위	조위편차
1	2004/08/02	527	524	-3	1	2001/08/21	322	326	+4
2	2004/07/04	526	550	+24	2	2001/08/19	322	321	-1
3	2004/08/03	524	522	-2	3	2004/08/02	320	326	+6
...					...				
49	1997/07/22	506	491	-17	27	1997/08/20	311	304	-7
...					...				
115	1997/08/19	497	530	+33	40	1997/08/18	309	310	+1

506 cm에서 1990년대 자료인 1997년 7월 23일 고조위가 처음 나타나고 있다. 관측된 결과도 1위는 2004년 7월 4일의 550 cm인 반면 1990년대 최고급 관측조위는 1997년 8월 19일의 530 cm인데 이때의 예측조위는 497 cm에 불과하지만 태풍 WINNIE의 영향으로 33 cm의 해일고가 관측된 바 있다. 제주의 경우에도 상위 26위까지의 예측 고조위가 전부 2000년대 이후이며 27위에 비로소 1990년대 자료가 랭크되고 있는 등 목포와 유사한 결과를 보이고 있다. 이와 같이 서남해안에서 목포와 제주를 중심으로 2000년대 이후 예측 고조위가 크게 상승한 결과를 보이고 있는데, 본 고에서는 이러한 상승결과가 단지 지구온난화에 의한 평균해수면 상승에만 기인하는지 여부를

먼저 고찰하고자 한다.

2.2 분조별 진폭변화

Table 2와 Table 3에 서남해안의 분석대상 조위관측소 및 참고자료별 주요 분조의 90년대와 2000년대 진폭변화를 기준조석과 함께 각각 제시하였다. 자료기간이 그리 길지 않아 자료로부터 도출된 결과의 정량적 신뢰도는 다소 결여되고 있지만 2000년대 이후의 조위변화에 대한 정성적 분석에는 크게 문제가 없을 것으로 사료된다. 우선 서남해안의 경우를 제시한 Table 2의 평균해수면(Zo)은 전반적으로 증가추세를 보이고 있고, 특히 제주, 거문도, 목포의 증가가 눈에 띄게 나타나고 있다. 주요 4대 분조 중

Table 2. Variations of major tidal constituents at several southwestern sites

조위 관측소	시기	분조별 진폭 및 시기별 변화량(cm)									
		Zo	M ₂	S ₂	K ₁	O ₁	Sa	AHHW			
목포	기준조석(2002)	243.0	141.1	47.8	30.5	23.6	-	486.0			
	1994*-1999	239.0	140.5	47.6	30.6	23.3	16.0	481.0			
	2000-2006	244.9	142.4	48.6	30.8	23.8	19.0	490.5			
완도	기준조석(1983)	200.2	107.1	46.1	27.1	19.9	-	400.4			
	1990-1999	205.8	104.7	44.9	26.8	19.3	15.3	401.5			
	2000-2006	208.1	102.8	44.4	26.9	19.8	17.1	402.0			
여수	기준조석(1966)	180.8	101.2	47.4	20.0	12.2	-	361.6			
	1990-1999	185.3	97.6	44.6	18.9	12.7	15.5	359.1			
	2000-2006	185.2	95.0	43.8	19.0	13.0	16.8	356.0			
거문도	기준조석(1983)	170.0	89.7	40.1	23.4	16.8	-	340.0			
	1990-1999	176.4	88.3	39.3	23.1	16.4	14.2	343.5			
	2000-2006	183.7	86.9	39.3	23.1	14.8	16.1	346.8			
추자도	기준조석(1983)	167.8	87.6	35.0	26.0	19.2	-	335.6			
	1990-1999	172.2	86.8	34.0	26.2	19.3	14.4	338.5			
	2000-2006	173.6	86.1	33.8	26.3	19.6	16.8	339.4			
제주	기준조석(1975)	139.0	69.7	29.5	23.0	16.8	-	278.0			
	1990-1999	154.1	69.0	28.2	22.9	16.7	16.4	290.9			
	2000-2006	161.5	67.8	27.8	22.9	16.9	18.8	296.9			
서귀포	기준조석(1974)	151.6	75.7	33.7	24.5	17.7	-	303.2			
	1990-1999	160.4	76.3	33.8	24.3	17.8	15.7	312.6			
	2000-2006	164.8	74.5	33.3	24.2	18.0	17.1	314.8			

*목포의 경우 금호방조제 건설이후의 자료

Table 3. Variations of major tidal constituents at other sites

조위 관측소	시기	분조별 진폭 및 시기별 변화량(cm)													
		Zo	M ₂	S ₂	K ₁	O ₁	Sa	AHHW							
서 해 안	기준조석(1944)	463.5	286.2	112.7	39.4	25.2	-	927.0							
	인천	1990-1999	456.5	286.4	110.8	39.3	28.3	19.5	921.3						
	2000-2006	461.3	286.1	114.6	39.4	29.2	19.0	930.6	+4.8	-0.3	+3.8	+0.1	+0.9	-0.5	+9.3
	군산	기준조석(1980)	362.3	220.1	81.6	34.4	26.2	-	724.6						
	외항	1990-1999	360.5	217.9	82.5	34.1	25.3	18.5	720.3						
	2000-2006	367.3	213.4	84.8	34.8	25.6	18.6	725.9	+6.8	-4.5	+2.3	+0.7	+0.3	+0.1	+5.6
동 부 남 해 안	기준조석(1976)	141.0	79.6	37.0	14.7	9.7	-	282.0							
	통영	1990-1999	145.9	78.4	36.0	14.7	9.7	12.9	284.7						
	2000-2006	147.3	76.2	35.4	14.7	9.9	14.5	283.5	+1.4	-2.2	-0.6	0.0	+0.2	+1.6	-1.2
	가덕	기준조석(1978)	95.3	56.7	26.3	8.0	4.3	-	190.6						
	도	1990-1999	97.3	55.4	25.8	7.7	4.2	12.6	190.4						
	2000-2006	100.3	52.6	25.5	7.8	4.2	14.3	190.4	+3.0	-2.8	-0.3	+0.1	0.0	+1.7	0.0
부 산	기준조석(1974)	64.9	40.0	18.9	4.4	1.6	-	129.8							
	1990-1999	68.7	39.2	18.2	4.3	1.6	10.9	132.0							
	2000-2006	70.7	37.8	17.9	4.4	1.7	11.3	132.5	+2.0	-1.4	-0.3	+0.1	+0.1	+0.4	+0.5
	울산	기준조석(1976)	30.4	16.3	7.8	3.3	3.0	-	60.8						
	1990-1999	30.1	15.9	7.5	3.2	2.9	11.7	59.6							
	2000-2006	32.0	15.5	7.3	3.2	2.9	11.8	60.9	+1.9	-0.4	-0.2	0.0	0.0	+0.1	+1.3
동 해 안	기준조석(1966)	18.8	6.9	2.3	4.9	4.7	-	37.6							
	목호	1990-1999	18.4	6.5	2.2	4.7	4.5	11.0	36.3						
	2000-2006	21.4	6.1	2.1	4.7	4.5	10.7	38.8	+3.0	-0.4	0.0	0.0	-0.3	+2.5	
	속초	기준조석(1975)	19.5	7.1	2.5	5.1	4.8	-	39.0						
	1990-1999	22.4	7.0	2.5	5.0	4.6	11.8	41.8							
	2000-2006	24.3	6.9	2.5	5.0	4.6	11.8	43.6	+1.9	-0.1	0.0	0.0	0.0	+1.8	

*인천의 경우 90년대까지는 월미도에서의 자료

M₂ 분조의 진폭만 2 cm 전후의 변화를 보이고 있는 반면 S₂, K₁, O₁ 분조의 진폭변화는 대부분 1 cm 이하의 변화를 보이고 있다. M₂분조의 경우 목포만 증가하고 있으며 여타 관측소에서는 감소추세를 보이고 있는데, 이는 항만개발과 같은 인위적 요소와 함께 달의 공전평면과 관련된 18.6년 주기에 따라 M₂분조의 진폭이 1997년을 정점으로 감소하는 것(Pugh, 1987) 등에 기인하는 것으로 추정된다.

Table 2에 각 기준검조소에서 기준조석을 병기하였는데, 기준조석이 설정된 시기를 함께 고려해 볼 때 평균해수면의 뚜렷한 증가와 M₂분조 및 S₂분조 등 반일주조 진폭의 감소를 볼 수 있는 반면 일주조 성분은 큰 변화를 보이지 않고 있다. 또한 평균해수면과 4대분조의 합으로 산정되는 약최고조위(AHHW)의 변화는 평균해수면이 크게 상승한 목포와 제주에서 역시 매우 크게 나타나고 있다. 한편 연주조인 Sa분조의 경우 전체 관측소에서 증가추세로 나타나고 있는데, 본 고에서는 여기에 좀더 관심을 갖고 분석을 시행하였다.

Table 3의 주변 참고지점에서의 결과도 Table 2의 결과와 유사하게 나타나고 있다. 즉, 평균해수면은 증가추세를 보이고 있으며 M₂분조 진폭은 감소추세를 보이는 반면, 일주조 성분은 큰 변화를 보이지 않고 있다. 연주조인 Sa분조는 Table 2에서와 같이 서남해안 전반에 걸쳐 증가추세를 보이는 반면 Table 3에서는 남해안의 동부지역에서만 약간의 증가추세를 보일 뿐 서해안과 동해안에서는 증가추세를 보이지 않고 있다. 이상과 같이 주변의 참고지점의 자료까지 종합하여 볼 때, 본 연구의 관심대상인 서남해안에서는 국내 여타해역에서와 마찬가지로 최근 M₂분조는 감소추세인 반면 지구온난화로 인해 평균해수면은 증가추세를 보이고 있다. 그러나 동해안 및 서해안과 달리 2000년대 들어서 서남해안에서 계절조인 Sa분조의 진폭이 다소 증가한 결과를 보이고 있으며, 이는 하절기 해수온도의 증가에 기인한 것으로 추정된다. 즉, 지구온난화에 따라 평균해수면이 상승함과 더불어 서남해안에서는 수온상승이 하절기에 더욱 두드러져 Sa분조 진폭의 상승으로 나타난 것으로 파악된다.

Sa분조는 태양연주조라는 천문조이지만 1년 주기의 계절별 기후변화에 의한 기상학적 효과가 더욱 크게 나타나는 분조(Dronkers, 1964)이다. 이 분조로 인해 여름철의 평균해수면을 비롯한 각종 조위면이 겨울철보다 높아지게 된다. Kang and Lee(1985)의 평균해수면의 계절별 변화분석에 의하면, 한국 연안 평균해수면이 여름에 높고 겨울에 낮은 이유가 대기압 및 해수밀도 변화에 기인하는 것으로 파악하고 있다. 대기압 변화에 의한 영향은 한국 연안 어디에서나 거의 균일하며 연주기 진폭이 약 8.5 cm인 반면, 수온변화에 의한 효과는 4-8 cm로서 서해안에서 가장 큰 것으로 파악하고 있다. 또한 계절풍의 영향으로 인하여 평균해수면의 연교차가 동해의 20 cm에 비해 서해에서는 40 cm까지 벌어지는 것으로 기술하고 있다. Sa분조의 영향은 평균해수면의 계절적 변화에만 국한하는 것이 아니라 고조위에까지 영향을 미치게 되는 것은 당연하며 분조의 진폭이 커질수록 그 영향성은 증대된다. 따라서 Sa분조가 최근 서남해역에서 다소 증가하였다는 사실은 평균해수면 상승에 부가하여 여름철 고조위 상승이 더욱 크게 나타나고 있음을 의미하고 있다.

2.3 계절별 예측조위 변화

평균해수면, 반일주조, 연주조의 변화에 따라 각 기준검조소에서의 조화상수에 의한 예측조위도 변화하게 된다. 평균해수면이 상승하고 반일주조가 커지면 예측조위 중 고조위가 커지게 된다. 전술하였듯이 본 연구에서는 각 관측소 별로 해당연도의 1시간 조위관측자료로부터 조화분석을 통해 추출된 100개 이상의 조화상수를 그대로 사용

하여 당해연도의 조위를 재현시켰다. 이렇게 함으로써 조위 관측치를 사후추정 예측치와 조위편차로 분리할 수 있게 되며 예측치는 순수하게 천문조만 포함(Sa분조는 포함)하게 된다. 이렇게 매년 작성된 예측조위는 전술한 평균해수면과 주요 분조 변화가 반영되므로 특히 고조위에 적지 않은 변화가 나타나게 된다. 이렇게 작성된 매 월 예측된 최고고조위 자료에 대한 계절별 평균값 또는 연평균값을 1990년대와 2000년대로 구분하여 Table 4에 제시하였으며 해당 기간 중 예측 최고조위도 함께 제시하였다.

평균해수면과 반일주조가 모두 증가한 목포의 경우 예측 고조위가 2000년대 들어 평균 7.7 cm 증가해 최대를 보이고 있으며 평균해수면 상승이 두드러지는 제주와 거문도가 각각 6.1 cm와 4.9 cm의 증가를 보이고 있는 반면 해수면상승이 없고 반일주조가 감소한 여수의 경우 예측 고조위가 5.6 cm 감소한 결과를 보이고 있다. 한편 Table 2에서 연주조는 모두 증가한 것으로 나타나고 있는데 Table 4에 보듯이 여타 계절 변화량과 비교해 볼 때 하절기(7월~9월) 증가량이 훨씬 크게 나타나는 결과를 보이고 있으며, 특히 목포와 제주 및 거문도 등에서 하절기 예측 고조위가 크게 상승한 결과를 보이고 있다. 연중 가장 조위가 높은 시기인 하절기의 고조위가 더욱 상승함에 따라 예측 고조위 역시 크게 증가하게 되어 연평균값의 증가량을 훨씬 상회하는 결과를 보이고 있으며, 특히 목포, 제주, 거문도 등의 예측 고조위는 10 cm 이상의 상승을 보이고 있다. 즉, 국내 서남해역에서는 평균해수면의 상승과 함께 특히 하절기 해수면상승이 최근 두드러지게 증가한 결과를 보이고 있다.

Table 4. Seasonal variation of monthly highest forecasted high water level (cm)

조위 관측소	시기		계절별 구분						고조위					
			1월~3월		4월~6월		7월~9월			10월~12월		1월~12월		
목포	1994-1999	증감	465.2		485.0		488.2		485.2		480.9		506.0	
	2000-2006		+6.8	472.0	+3.9	488.9	+16.9	505.1	+3.3	488.5	+7.7	488.6	+21.0	527.0
완도	1990-1999	증감	402.6		409.4		415.6		408.7		409.0		434.0	
	2000-2006		0.0	402.6	-6.7	417.5	+1.9	417.5	-2.1	406.6	-1.6	407.4	+3.0	437.0
여수	1990-1999	증감	367.7		372.9		383.7		371.5		374.0		401.0	
	2000-2006		-2.5	365.2	-11.2	382.0	-1.7	382.0	-7.0	364.5	-5.6	368.3	+3.0	404.0
거문도	1990-1999	증감	341.9		347.3		355.6		348.2		348.7		372.0	
	2000-2006		+7.4	349.3	+0.5	365.3	+9.7	365.3	+3.7	351.9	+4.9	353.6	+12.0	384.0
추자도	1990-1999	증감	324.6		333.3		337.0		334.4		332.3		354.0	
	2000-2006		+3.2	327.8	-3.2	344.3	+7.3	344.3	+3.0	337.4	+2.6	334.9	+6.0	360.0
제주	1990-1999	증감	278.2		289.4		297.6		291.4		289.2		311.0	
	2000-2006		+9.5	287.7	+2.3	291.7	+11.6	309.2	+5.0	296.4	+6.1	295.8	+11.0	322.0
서귀포	1990-1999	증감	300.9		308.4		317.8		312.9		310.8		332.0	
	2000-2006		+4.9	305.8	+0.4	308.8	+6.8	324.6	+0.6	313.5	+2.4	313.2	+8.0	340.0

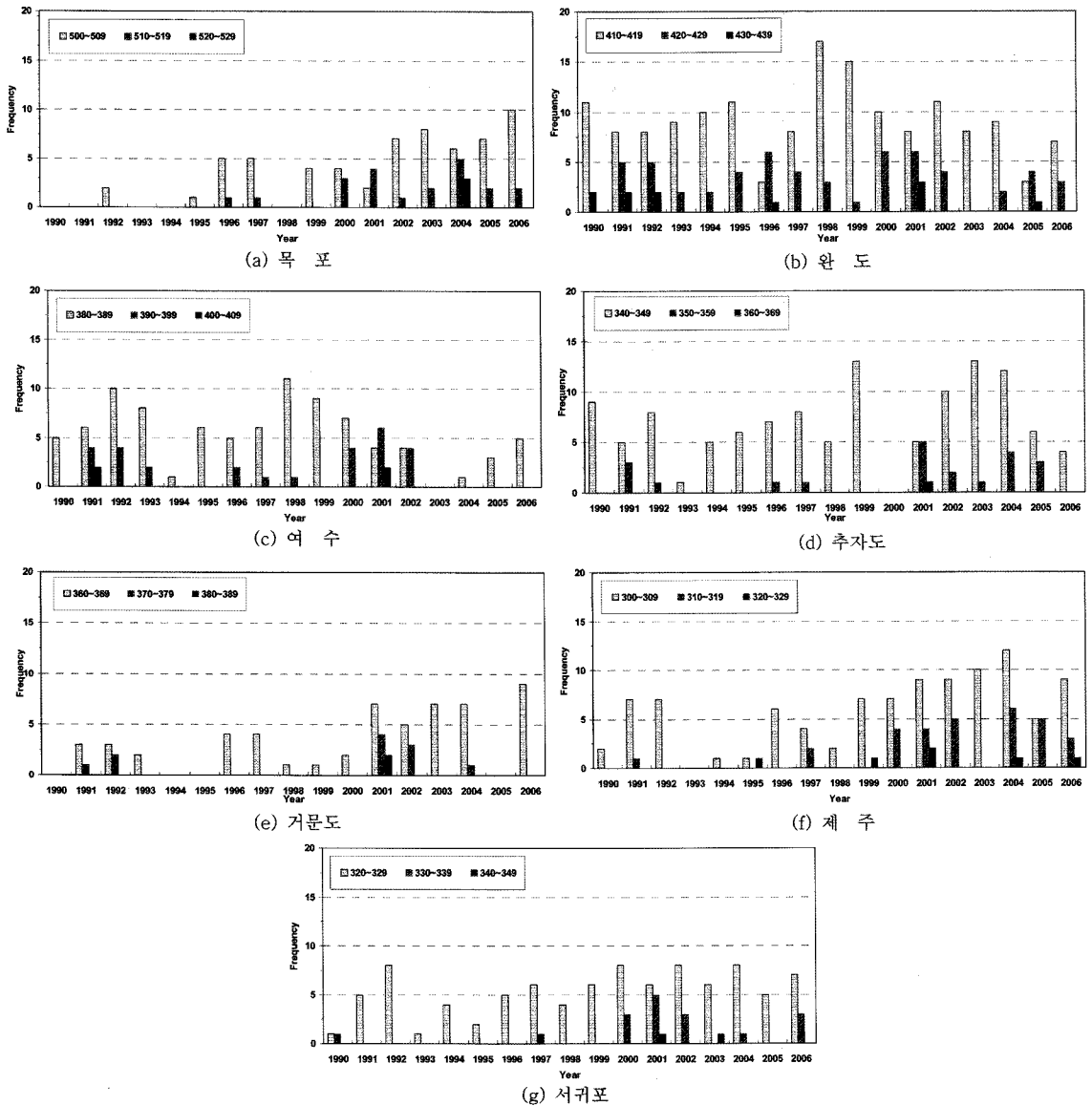


Fig. 2. Frequency of forecasted high water level.

즉, 목포의 경우 1990년대까지만 하더라도 하절기에 매월 최고조위는 488 cm 정도가 예상되었던 것이 2000년대 들어서는 하절기 매월 최고조위가 505 cm 정도로 예측되고 있다. 또한 1999년 이전까지 최대 예측조위는 1997년 7월 22일의 506 cm였지만 2000년 이후에는 2004년 8월 2일 527 cm까지도 예측되고 있는 실정이다. 제주의 경우도 하절기 매월 예측최고조위가 10 cm 이상 증가하였으며 하절기에 특히 고조위 상승이 두드러지는 현상은 서남해안 전역에서 발생하고 있어 결과적으로 모든 지점

에서 최대 예측조위가 적지 않게 상승한 결과를 보이고 있다.

Fig. 2는 Table 4의 서남해안 검조소에서 1990년대 이후 전술한 방법으로 예측된 고조위 자료 중 일정값 이상이 발생한 빈도를 도시한 것이다. 즉 Fig. 2는 순수하게 천문조(Sa분조 포함)만 포함하고 있으며 해일고(조위편차) 성분은 포함하고 있지 않은데, 여수와 완도를 제외한 서남해안 모든 지점에서 2000년대 들어 고조위 상승이 뚜렷하게 나타나고 있다. 특히 목포에서의 2000년 이후 발생

빈도 증가량은 제주 조위관측소와 함께 가장 큰 것으로 분석되었다. 앞서 분석한 바와 같이 목포에서는 평균해수면(Zo) 상승 및 연주소(Sa분조)의 증가가 두드러진 반면 제주에서는 평균해수면 상승이 눈에 띄게 나타나고 있다.

3. 해일고 분석

3.1 해일고 변화

Table 5와 Table 6에 1990년대 및 2000년대에 서남해안에 영향을 미친 태풍 및 그 기간 서남해역 7개 검조소에서의 최대 해일고를 함께 제시하였다. 1990년대에는 10년간 22개, 2000년대에는 7년간 17개의 태풍이 영향을 미쳐 연간 평균 약 2.2개와 2.4개가 영향을 미친 것으로 나타나고 있다. 태풍의 개수도 다소 증가하였지만 그보다 더욱 심각한 것은 태풍의 위력이 상당히 증대되었다는 것이다. 즉, 1990년대 최대해일고(Table 5)에 비해 2000년대 최대해일고(Table 6)의 증가량이 5 cm(목포)~67 cm(거문도)에 이르고 있는데, 이는 2000년대 들어 7년의 짧은 기간 동안에도 RUSA(0215), MAEMI(0314), NABI(0514) 등 초대형 태풍의 발생이 잦아짐에 연유하고 있다. 또한

이들 태풍은 거의 대부분 7월~9월에 집중되고 있어 전술한 바와 같은 목포와 제주 등 서남해안에서 하절기 예측 고조위 상승을 함께 감안할 때 하절기 이상조위 발생 가능성은 매우 우려스러운 수준이 되고 있는 것이다. 게다가 1997년을 기점으로 감소추세였던 18.6년 주기의 영향을 받는 분조의 진폭은 2006년 최저를 기록한 후 향후 9년간 증가할 것이기 때문에 고조위 상승은 더욱 가속될 전망이다.

3.2 기상태풍 모의

우리나라 동남해안에 가장 큰 해일고를 유발한 태풍이 MAEMI인 반면 서남해안에 가장 큰 해일고를 유발한 태풍은 RUSA이다. 고흥반도에 상륙한 RUSA로 인해 서남해안 대부분 지역에서 역대 최대 해일고를 기록하게 되었다. 2000년대 들어 발생이 잦고 있는 초대형 태풍에 의해 앞으로도 해일고 기록은 지속적으로 경신될 전망이다. RUSA 규모의 태풍이 경로만 바뀐 상태에서 각 해역에 어느 정도의 해일고를 초래하는지 이전 연구(문 등, 2007)와 유사한 방법으로 살펴보았다. 즉, RUSA의 정상진로와 진로의 경도를 서측으로 1° 및 2° 이동시킨 가상진로

Table 5. Typhoon name and corresponding surge height (1990's)

연도	태풍명	영향기간	해일고(cm)						
			목포	완도	여수	거문도	추자도	제주	서귀포
1990	ROBYN(9007)	7/11~12	27	24	20	27	11	8	13
	CAITLIN(9109)	7/28~29	36	32	30	33	33	39	37
1991	GLADYS(9112)	8/22~24	32	42	52	45	35	37	52
	KINNA(9117)	9/13~14	28	26	31	27	24	19	23
	MIREILLE(9119)	9/27	26	23	33	26	19	17	16
	JANIS(9210)	8/08	14	24	28	20	16	16	18
1992	TED(9219)	9/24	32	29	27	18	21	16	15
	ROBYN(9307)	8/09~10	36	35	47	44	32	19	22
1994	BRENDAN(9411)	7/31~8/01	23	20	17	6	12	14	19
	DOUG(9413)	8/10~11	31	40	25	25	31	30	26
	ELLIE(9414)	8/14~15	42	33	25	26	33	35	43
	SETH(9429)	10/11~12	33	54	52	36	40	28	35
1995	RIAN(9514)	9/23	23	32	29	23	28	21	22
1996	KIRK(9612)	8/13~14	20	30	35	30	26	20	25
1997	PETER(9708)	6/27~28	24	20	19	20	19	23	26
	TINA(9711)	8/08~09	26	40	25	20	21	23	26
	WINNIE(9713)	8/19~20	33	25	16	31	22	18	11
1998	YANNI(9809)	9/30~10/01	19	66	69	38	32	30	32
	NEIL(9905)	7/26~27	25	47	33	33	32	35	36
1999	OLGA(9907)	8/02~03	31	72	40	32	45	32	48
	PAUL(9908)	8/07~08	26	21	19	19	16	20	23
	BART(9918)	9/23~24	53	35	36	29	29	18	15
최대 해일고			53	72	69	45	45	39	52

Table 6. Typhoon name and corresponding surge height (2000's)

연도	태풍명	영향기간	해일고(cm)						
			목포	완도	여수	거문도	추자도	제주	서귀포
2000	KAI-TAK(0004)	07/10	15	17	21	22	-	13	15
	BOLAVEN(0006)	07/30~31	27	17	21	22	-	13	15
	PRAPIROON(0012)	08/31	48	41	24	19	-	33	28
2002	RAMMASUN(0205)	07/05~06	24	31	21	18	19	23	27
	FENGSHEN(0209)	07/26~27	23	26	18	20	32	25	31
	RUSA(0215)	08/30~31	59	90	120	87	77	78	89
2003	SOUDELOR(0306)	06/19	24	20	17	18	18	22	25
	MAEMI(0314)	09/12~13	26	41	125	84	24	34	38
2004	MINDULLE(0407)	07/04	18	14	13	10	9	9	9
	NAMTHEUN(0410)	08/01	14	5	6	8	8	10	13
	MEGI(0415)	08/19	52	38	48	45	22	24	28
	CHABA(0416)	08/30	42	36	48	42	29	26	31
	SONGDA(0418)	09/07	40	39	35	40	38	30	38
2005	NABI(0514)	09/06	36	73	53	112	43	44	47
	EWINIAR(0603)	07/10	35	70	65	37	50	29	44
2006	WUKONG(0610)	08/09	8	0	1	3	27	9	6
	SHANSHAN(0613)	09/17	34	31	38	29	34	32	38
최대 해일고			59	90	125	112	77	78	89

Table 7. Grid information

구분	광역	중간역
계산영역	30°×30°	5°×5°
격자범위	115.0°~145.0°E, 20.0°~50.0°N	125.0°~130.0°E, 32.5°~37.5°N
격자간격	$\Delta X = \Delta Y = 1/20^\circ$	$\Delta X = \Delta Y = 1/120^\circ$
격자수	601×601	601×601

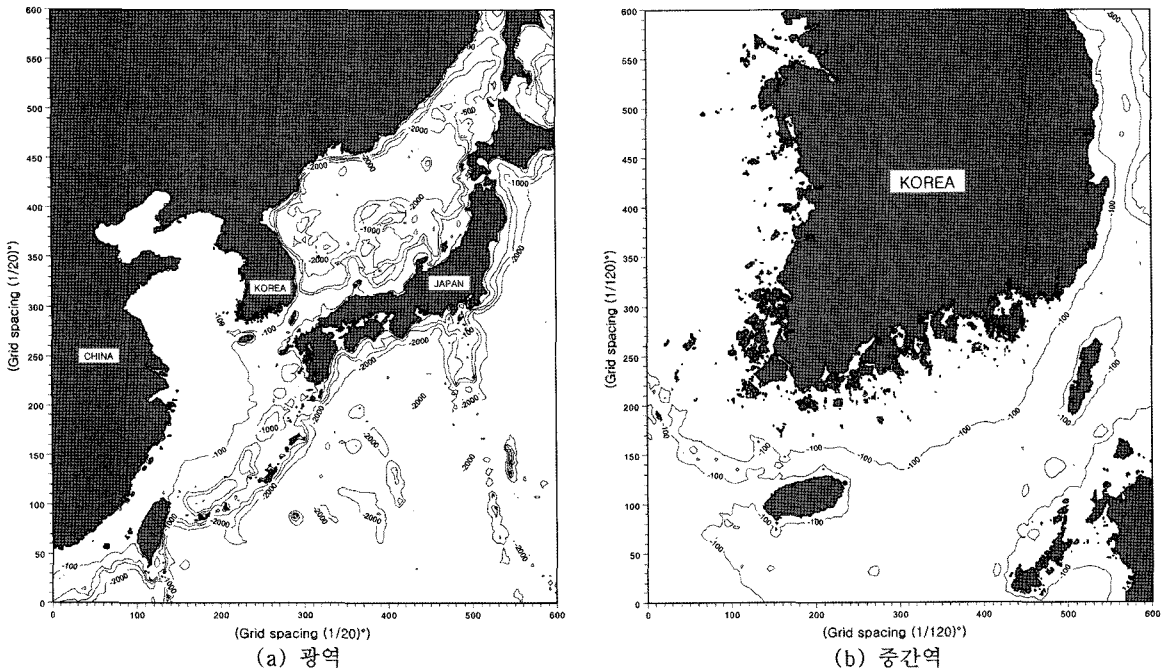


Fig. 3. Bathymetry for the typhoon simulations.

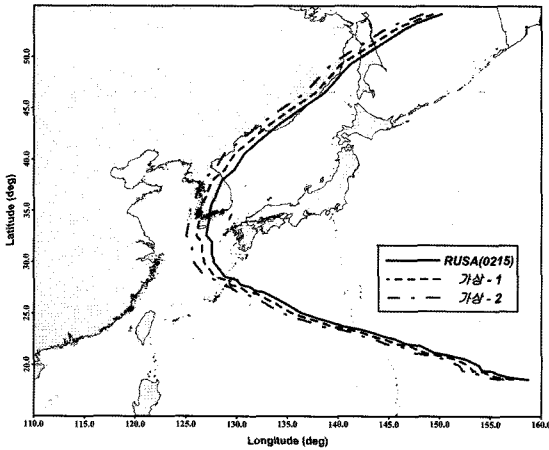


Fig. 4. Typhoon tracks.

에 대한 해일모의를 수행하였다.

해일모의를 위해 Table 7 및 Fig. 3과 같이 선행연구(문 등, 2006)와 동일한 광역 및 중간역 격자체계를 수립하였다. 광역의 해일모의 결과로부터 중간역에 해당하는 외해경계조건을 재생성하여 중간역의 해일모의를 수행하였다. 기압장과 풍속장은 선행연구와 동일한 방법으로 MIKE21의 CYWIND를 이용하여 태풍의 진로, 중심기압, 최대풍 반경 등에 대한 정보를 활용하여 30분 간격으로 생성하여 적용하였다. Fig. 4는 RUSA의 실제진로와 가상진로를 나타낸 것이다. RUSA는 내습 당시 고흥반도에 상륙하여 북동진하며 한반도를 통과하였다. 당시 태풍중심이 목포에 가장 근접했을 때 태풍중심과의 거리는 동쪽으로 약 100 km 정도였다. 실제진로의 경도를 1° 이동시킨 가상진로-1의 경우 목포를 관통하게 되며, 가상진로-2는 목포로부터 서쪽으로 약 100 km 지점을 통과하게 된다.

이상과 같이 설정된 해일모의 결과를 Table 8에 나타내었다. 실제경로 모의 결과 여수에서의 결과만 다소 크게 나타나고 있을 뿐 여타 지점의 결과는 관측치와 대체적으로 부합하고 있다. 또한 경로변화에 따른 가상태풍에

의해 각 지점에서 적지 않은 해일고 변화를 보이고 있는데 특히 서남단에 위치하고 있는 목포와 완도에서 가상태풍에 의한 해일고가 매우 크게 나타나고 있다. 목포의 경우 경로에 따라 기왕최대 해일고를 70 cm나 초과하는 최대 130 cm의 해일고도 발생할 가능성이 있는 것으로 나타나고 있다. 이러한 가상태풍의 추산치를 인근 해역에서의 관측치와 함께 감안할 때 현재까지 목포에서 관측된 최대 해일고 59 cm를 초과하는 태풍 발생 가능성은 매우 높다고 할 수 있다.

4. 결과분석

만일 각 검조소별 최대 해일고를 야기했던 태풍이 해당월의 대조기와 일치했다는 가정하에 상기 7개 지점에서 1990년대와 2000년대로 구분하여 최고조위(예측월별 최고조위+최대해일고)를 계산하면 Table 9와 같다. 여기서 예측월별최고조위는 Table 4의 하절기 값이며 최대해일고는 Table 5 및 Table 6의 값이다. 즉, 1990년대에 목포에서 최대해일고(53 cm)를 야기할 바 있는 태풍 BART가 대조기 고조시(488 cm)에 발생했을 경우의 가상적인 최고조위는 541 cm인 반면 2000년대에 최대해일고(59 cm)를 야기한 태풍 RUSA가 대조기 고조시(505 cm)에 발생했을 경우는 564 cm로서 23 cm가 증가한 결과를 보이고 있다. 목포 뿐 아니라 다른 6개 지점에서도 Table 9에서와 같이 20 cm(완도)~76 cm(거문도) 증가한 결과를 보이고 있어 서남해안 전반에 걸쳐 태풍해일에 의한 범람 가능성이 매우 높아진 상태라 할 수 있다. 특히 지구온난화에 의한 해수면 상승효과가 크게 나타나고 있어 하절기 예측고조위가 매우 높아진 목포와 제주에서의 해일 및 이상고조는 지속적인 관찰과 주의가 필요한 것으로 판단된다.

목포의 경우 2000년대 발생한 초대형 태풍인 RUSA나 MAEMI의 직접적 영향이 적어 다른 지점의 최대해일고 증가량이 수십 cm인 것에 비해 6 cm에 불과하고 있어

Table 8. Surge heights according to the typhoon tracks(unit : cm)

지점	경로		수치모의		관측치
	실제	가상-1	가상-2	가상-2	
목포	56.8	62.3	130.4	59.0	
완도	90.6	148.7	137.4	90.0	
여수	146.1	120.9	75.9	120.0	
거문도	82.8	92.7	62.0	87.0	
추자도	85.7	92.1	95.3	77.0	
제주	88.0	73.0	57.8	78.0	
서귀포	89.0	93.4	72.1	89.0	

Table 9. Comparisons of highest water level considering surge height

검조소	최대해일고(cm)		대조기 고조위(cm)		최고조위(cm)		증분
	1990년대	2000년대	1990년대	2000년대	1990년대	2000년대	
목포	53	59	488	505	541	564	23
완도	72	90	416	418	488	508	20
여수	69	125	384	382	453	506	53
거문도	45	112	356	365	401	477	76
추자도	45	77	337	344	382	421	39
제주	39	78	289	305	328	383	55
서귀포	52	89	318	325	370	414	44

2000년대 들어 초대형 태풍의 영향을 상대적으로 덜 받았다고 할 수 있다. 즉, 만일 RUSA나 MAEMI와 같은 초대형 태풍의 경로가 목포방향이었다면 Table 9의 다른 지점과 같이 목포에서의 최대해일고 역시 2000년대 들어 매우 상승했을 것이다.

선행연구(강 등, 2006)에서 1960년~2004년 기간의 목포검조소 자료를 분석하여 61 cm의 고극조위 상승이 있었음을 밝힌 바 있다. 이 중 tidal choking effect(TCE) 기능의 약화(Kang, 1999; Byun et al., 2004)에 따라 고극조위가 증가한 양이 영산강하구언 건설에 의해 23 cm, 영암방조제와 금호방조제 건설에 따라 각각 15 cm, 10 cm로 건설로 인해 48 cm 상승하였으며, 지구온난화에 의한 상승이 연 2.9 mm씩 13 cm인 것으로 파악되었다. 또한 TCE 기능의 약화에 따른 상승 외에도 조간대 효과의 감소에 따라 대조 또는 극조시 조석확폭이 더욱 크게 작용하게 됨을 지적한 바 있다. 따라서 목포구의 TCE 기능 약화로 인한 고조위 상승은 이상고조 발생시 더욱 크게 나타나며 이는 목포해역의 해일 위험성이 크게 높아진 결과를 초래하고 있다는 결론을 제시하였다.

이와 같이 목포해역은 4가지 측면에서 과거에 비해 해일에 의한 범람위험이 매우 높아진 상태이다. 즉, 하구언/방조제 건설에 의한 고조위 상승, 지구온난화에 따른 평균해수면 상승 및 하절기 예측고조위 증가, 조위가 높아질수록 TCE 기능이 더욱 약해지는 조간대 효과, 2000년대 들어 더욱 우려되는 초대형 태풍에 의한 해일 등이 그것이다. 이들 중 첫 번째는 건설직후에 이미 현상적으로 나타난 것이고 두 번째는 지속적인 증가를 보이는 사항이다. 세 번째와 네 번째는 향후 발생할 것이 우려되며 발생할 경우 심대한 피해가 예상되는 사항이다.

5. 결 론

본 연구에서는 서남해안에 위치한 목포, 완도, 여수, 거

문도, 추자도, 제주, 서귀포 등 7곳의 기준검조소를 대상으로 1990년 이후의 조위자료 분석을 통해 고조위 및 조위편차의 연별 변화를 살펴보기 위해 선행연구(강주환 등, 2006)에서 사용된 사후추정법을 이용하여 조위자료를 분석하였다. 분석결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

1) 서남해안 전반에 걸쳐 평균해수면이 뚜렷하게 증가하는 반면 M_2 분조 및 S_2 분조 등 만일주조 진폭은 감소하고 있다. 평균해수면 상승폭이 상대적으로 지배적이어서 약최고고조위는 증가경향을 보이고 있으며 목포와 제주의 상승폭이 매우 크게 나타나고 있다.

2) 연주조인 Sa분조는 서남해안 전반에 걸쳐 2000년대 들어 증가한 결과를 보이고 있다. Sa분조가 증가하였다는 사실은 평균해수면 상승에 부가하여 여름철 고조위 상승이 더욱 크게 나타나고 있음을 의미하고 있어 특히 하절기 해수면상승이 최근 두드러지게 증가한 결과를 보이고 있다.

3) 1990년대 최대해일고에 비해 2000년대 최대해일고의 증가량이 5 cm(목포)-67 cm(거문도)에 이르고 있는데, 이는 2000년대 들어 RUSA(0215), MAEMI(0314), NABI(0514) 등 초대형 태풍의 발생이 잦아짐에 연유하고 있다. 또한 이들 태풍은 거의 대부분 7월~9월에 집중되고 있어 하절기 예측 고조위 상승을 함께 감안하면 20 cm(완도)~76 cm(거문도) 증가한 결과를 보이고 있어 서남해안 전반에 걸쳐 하절기 이상조위 발생 가능성은 매우 우려스러운 수준이 되고 있다.

4) 특히 목포의 경우 2000년대 발생한 초대형 태풍의 직접적 영향이 적어 다른 지점보다 해일고가 적게 나타났었다고 볼 수 있으며, 가상태풍에 관한 수치실험 결과 주변지점에서 관측된 정도의 해일고는 충분히 발생가능한 것으로 확인되었다. 선행연구(강 등, 2006)결과와 함께 본고의 내용을 종합하면, 건설에 의한 고조위 상승, 전지구적 해수면 상승, 조간대 효과, 향후 우려되는 초대형 태풍 등 4가지 측면에서 목포해역은 과거에 비해 해일에 의

한 범람위험이 매우 높아진 상태이며 이에 따른 대책마련이 시급한 상태이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 지역기술혁신사업의 연구비지원(05지역특성B05-01)에 의해 수행되었습니다. 또한 이 논문의 일부는 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2007-000-20009-0).

참고문헌

- 강주환, 문승록, 박선중 (2006). 조석/해일 환경변화를 감안한 고극조위 빈도분석. 대한토목학회논문집, 26(1B), 99-106.
- 강주환, 문승록, 오남선 (2005). 서남해안의 해수면 상승. 대한토목학회논문집, 25(2B), 151-157.
- 문승록, 박선중, 강주환, 박민원 (2007). 태풍 이동경로에 따른 서남해안의 해일고 추정. 한국해양해양공학학회 춘계학술대회 발표논문집.
- 문승록, 박선중, 강주환, 윤종태 (2006). MIKE21 모형을 이용한 목포해역 해일/범람 모의. 한국해양해양공학학회지, 18(4), 348-359.
- Byun, D.S., Wang, X.H. and Holloway, P.E. (2004). Tidal characteristic adjustment due to dyke and seawall construction in the Mokpo coastal zone, Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 59, 185-196.
- Choi, B.H., Roh, S.J., Lee, J.H. and Fang, G. (1999). An analysis on the mean sea level change of the seas adjacent to Korea. *Acta Oceanologica Sinica*, 18(3), 337-353.
- Dronkers, J.J. (1964). *Tidal Computations in Rivers and Coastal Waters*. North-Holland publishing company.
- Kang, J.W. (1999). Changes in tidal characteristics as a result of the construction of sea-dike/sea-walls in the Mokpo coastal zone in Korea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48(4), 429-438.
- Kang, Y.Q. and Lee, B.D. (1985). On the annual variation of mean sea level along the coast of Korea. *The Journal of the Oceanology Society of Korea*, 20(1), 22-30.
- Morton, R.A., Ward, G.H. and White, W.A. (2000). Rates of sediment supply and sea-level rise in a large coastal lagoon. *Marine Geology*, 167, 261-284.
- Murray, M.T. (1964). *Pol/PSMSL Tidal Analysis Software Kit(TASK Package)*. Proudman Oceanographic Laboratory.
- Nicholls, R.J. (2002). Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27, 1455-1466.
- Oh, I.S., Rabinovich, A.B., Park, M.S. and Mansurov, R.N. (1993). Seasonal sea level oscillations in the East Sea. *The Journal of the Oceanology Society of Korea*, 28(1), 1211-1220.
- Pang, I.-C. and Oh, I.-S. (1994). Long-period sea level variations around Korea, Japan, and Russia. *Bull. Korean Fish. Soc.*, 27(6), 733-753.
- Pugh, D. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons, 107-109.
- Pugh, D. (2004). *Changing Sea Levels*. Cambridge, 180-207.

Received November 20, 2007

Accepted December 28, 2007